بررسی اثر اندرکنش تونل-سازه بر نشست ساختمان‌های سطحی به روش عددی★

وهاب بشارت[۱] محمد داوودی[۲] محمدکاظم جعفری[۳]

چکیده امروزه با توجه به توسعه‌ی محیط‌های شهری و افزایش روزافزون جمعیت و مشکلات ترافیکی شهرهای بزرگ، همواره ساخت فضاهای زیرزمینی به‌عنوان یک راهکار مدنظر می‌باشد. ساخت این گونه سازه‌ها در محیط شهری و با وجود ساختمان‌های مسکونی بلند مرتبه، مستلزم تحلیل‌های دقیق اندرکنشی خاک و سازه خواهد بود. تحقیقات قبلی محققان بیانگر تفاوت نتایج ناشی از تحلیل‌های روش‌های حل بسته و روش‌های عددی اندرکنشی می‌باشد. در این تحقیق تونل نیایش-صدر در شمال تهران به دهانه‌ی حفاری حدود ۱٤ متر که به روش حفاری مرحله‌ای درحال حفاری و ساخت می‌باشد مورد بررسی قرار گرفته است. تونل مورد بررسی در مناطقی از شهر، از مجاورت سازه‌های سطحی بلند عبور می‌کند که روش حفاری انتخابی باعث ایجاد تغییرمکان در این سازه‌های سطحی خواهد شد. در بررسی حاضر به روش عددی و با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود PLAXIS 2D، به بررسی اثر اندرکنش تونل و سازه‌ی سطحی پرداخته شده است و عوامل مؤثر بر این اندرکنش نظیر وزن سازه‌ی سطحی، سختی فونداسیون مورد بررسی دقیق‌تر قرار گرفته است. در روش عددی استفاده‌شده، از مدل رفتاری موهر-کولمب برای خاک و مدل ارتجاعی خطی برای مصالح بتن تونل و سازه استفاده گردیده است. نتایج نشان دهنده‌ی افزایش نشست‌ها تا حدود ۱۵٪ با در نظر گرفتن این عوامل می‌باشد. با توجه به تنوع سازه‌ها از نظر نوع، موقعیت قرارگیری و نیز فاصله‌ی عمودی آن‌ها با تونل، امکان اختصاص یک مدل خاص برای کل سازه‌های موجود در مسیر وجود ندارد. هم‌چنین معیارهای ارزیابی رفتار سازه‌های سطحی در برابر نشست‌های ناشی از تونل‌سازی نیز تنوع زیادی داشته است که نتایج یکسانی نیز از این روش‌ها به‌دست نمی‌آید. در این تحقیق ضمن ارائه‌ی یک راهکار مناسب برای کنترل رفتار سازه برپایه‌ی نتایج تحلیل، طی یک مطالعه‌ی موردی به بررسی موقعیت قرارگیری سازه‌ها در برابر تونل نیز پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی تونل، روش حفاری مرحله‌ای، اندرکنش، سازه‌ی سطحی، روش عددی اجزای محدود، نشست.

An Investigation on Tunnel-Structure Interaction on Settlement of Surface Buildings with Numerical Method

V. Besharat M. Davoodi M.K. Jafari

Abstract *The construction of underground tunnel plays a more and more important role in the development of big cities. One of the most important problems caused by the construction of the tunnel is that underground excavation will cause large settlement of the ground and buildings. Previous studied showed the difference between numerical and experimental results. In this study the case study of Niyayesh-Sadr tunnel is selected and the conditions of this project were applied. This tunnel is located at north of Tehran with a span of 14 meters which constructing with the multi drift method. During construction, this tunnel should pass near some buildings near Mahyar Street then the settlement of surface should be considered. Numerical methods in this study was performed with the finite element code with PLAXIS 2D and the effect of tunnel-adjacent interaction is investigated. In addition the effect of foundation stiffness and weight of the structure is considered in these analyses and the results are compared to the emphasis on tunnel surface structure interaction. Results show that the settlements of foundation are increased 15% due to interaction analysis respect to green field one. Varieties of structures along the tunnel in surface, different overburden depth of the tunnel and also location of building respect to the axis of the tunnel need several numerical models in one project. In this study, one simple approach is suggested to control structures against settlement and prevent using several models.*

Keywords Tunnel, Multi Drift Method, Interaction, Surface Structure, Finite Element, Settlement.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۱/٤/۲۲ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۲/۱۵ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسئول، دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران.

(۲) استادیار پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران.

(۳) استاد پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران.

مقدمه

اجرای تونل در زمین‌های نرم باعث تغییر در تعادل اولیه، تغییر میدان تنش و تغییر شکل در توده‌ی خاک میزبان می‌گردد و محیط اطراف محل بازشدگی دچار تغییر شکل می‌شود. در مناطق شهری، این تغییر شکل‌ها اهمیت ویژه‌ای می‌یابد چرا که بر روی ساختمان‌های موجود، سازه‌های زیرزمینی مجاور و تأسیسات شهری مجاور تأثیرگذار خواهد بود. به این ترتیب، پیش‌بینی مقادیر تغییر شکل‌های حاصل از عملیات تونل‌سازی در مناطق شهری و ارزیابی اثرات آن بر روی سازه‌های موجود، یکی از مراحل بسیار مهم در روند برنامه‌ریزی شهری، تحلیل و طراحی سازه می‌باشد. با وجود این‌که حضور سازه‌های موجود در سطح زمین که وابسته به فاصله‌ی سازه تا تونل هستند، توسعه‌ی حرکات زمین را اصلاح می‌کنند، دانستن و درک نحوه‌ی توسعه‌ی این تغییرشکل‌ها و نشست‌های سطح زمین بدون درنظر گرفتن سازه و قبل از اضافه کردن پیچیدگی وجود سازه در حالت زمین بکر مهم می‌باشد. مسأله‌ی نشست‌های ناشی از عملیات تونل‌سازی در ٤۰ سال اخیر بسیار مورد علاقه‌ی محققان بوده است [1-5]. اکثر محققان در این مطالعات با تمرکز بر عواملی از قبیل نوع خاک، خصوصیات زمین‌شناسی، شرایط تنش اولیه، تأثیر فشار جانبی، روش تونل‌سازی و ناهم‌سانی خاک تلاش کرده‌اند تا ارزیابی دقیقی از نشست سطح زمین و مقدار آسیب‌های احتمالی بر سازه‌های سطحی ارائه دهند.

رویکرد موجود در تحلیل اندرکنش تونل-سازه محاسبه‌ی نشست‌های حالت میدان آزاد و ارزیابی پارامترهای تغییر شکل سازه مانند تغییر شکل نسبی، کرنش افقی و نشست‌های تفاضلی بر اساس موقعیت سازه و تونل می‌باشد که بر اساس آن‌ها خسارات وارد به سازه تخمین زده می‌شود[6-7] . در این رویکردها حضور سازه و پارامترهای حفاری تونل در نظر گرفته نمی‌شود. بر همین اساس نشست‌ها همواره متقارن ارزیابی می‌شود و پتانسیل خسارت ارزیابی‌شده با نتایج و مشاهدات عملی موجود متفاوت می‌باشد. این موضوع را Burd و همکاران [8] در تحقیق خود در خصوص اثر حفاری بر روی سازه هایی با مصالح بنایی ارائه کرده‌اند. محققان در رویکردی سختی نسبی را معرفی کردند که در آن سختی سازه‌ی سطحی به منظور اثر بر روی تغییر مکان سطح زمین ناشی از حفاری لحاظ گردیده است [9]. نقص موجود در این رویکرد این است که در این روش خصوصیات فونداسیون سازه و نیز پارامترهای حفاری لحاظ نگردیده است [10]. اثر اندرکنش تونل-خاک-سازه به روش کنترل تغییرمکان نیز با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS برای بررسی یک ساختمان ۵ طبقه در مجاورت حفاری تونل‌های دوقلو مورد بررسی قرار گرفته است [11]. نتایج این تحقیق که به‌صورت سه‌بعدی کامل و پیوسته صورت گرفت نیز نشان از کاهش تغییر مکان های سطح ناشی از به‌کارگیری این روش در حضور سازه دارد و این تغییر مکان ها در اثر حفاری تونل‌های دوقلو در مجاورت فونداسیون‌ها به‌شدت افزایش یافته است. در سال ۲۰۱۰ نیز محققان به بررسی اندرکنش تونل سازه به روش مستقیم و آزادسازی پرداختند. در این روش به مهندس طراح اجازه داده می شود تا با مسأله‌ی ژئوتکنیکی و سازه‌ای به‌طور مجزا برخورد کند و سپس به تشکیل ماتریس نسبتاً کوچکی که می توان آن را به‌صورت مستقیم نیز حل کرد، بپردازد [12].

به‌طور کلی می‌توان تحلیل‌های صورت گرفته در موضوع ایجاد نشست و تغییرمکان سطح و سازه‌های روزمینی را در اثر حفاری و ساخت تونل به دو بخش تحلیل‌ها با کمک روابط حل بسته برای حالت زمین بکر و نیز تحلیل‌های عددی به‌صورت‌های دوبعدی و سه‌بعدی با لحاظ کردن اثرات مختلف ژئوتکنیکی و سازه‌ای تقسیم کرد. با توجه به این‌که در روش‌های عددی امکان مدل‌سازی شرایط واقعی بهتر امکان‌پذیر می‌باشد لذا استفاده از این روش‌ها با نیم‌نگاهی به نتایج روش‌های حل بسته می‌توانند نتایج قابل‌قبول‌تر و

واقع‌بینانه‌تری ارائه دهد. در این روش‌ها استفاده از مدل‌های سه‌بعدی نیاز به صرف زمان و هزینه‌ی بیشتری دارد و نیز امکان مدل‌سازی تمامی ساخت و سازهای موجود در مسیر با توجه به تنوع آن‌ها وجود ندارد در حالی‌که می‌توان با لحاظ کردن فرضیات منطقی، اثرات سه‌بعدی را در مدل‌های دوبعدی دید.

در تحقیق حاضر اثرات اندرکنشی بین تونل و سازه‌های مجاور روزمینی با در نظر گرفتن سختی فونداسیون سازه‌ی سطحی و نیز اثرات وزن سازه‌ی احداث‌شده در سطح قبل از احداث تونل، بر مقدار این نشست‌ها مورد بررسی قرار خواهد گرفت. برای انجام این بررسی‌ها یک مطالعه‌ی موردی بر روی تونل نیایش-صدر که در قسمت شمالی شهر تهران واقع شده است با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS 2D V 8.2 که بر پایه‌ی روش اجزای محدود می‌باشد، انجام خواهد شد.

با دقت در معیارهای ارزیابی و تقسیم‌بندی خسارات مشاهده می‌شود که روش‌های بسیار متعددی برای ارزیابی ارائه شده است. در عمده‌ی این روش‌ها ارزیابی خسارت بر پایه‌ی دو عامل حداکثر نشست قائم و نیز اعوجاج زاویه‌ای می‌باشد. با توجه به تنوع انواع روش‌های ارائه شده و نتایج متفاوت به‌دست آمده در هر روش امکان تصمیم‌گیری قطعی در این خصوص در پروژه‌های عملی وجود ندارد. در این تحقیق تلاش شده تا در مطالعه‌ی موردی یادشده روشی ساده و کاربردی برای کنترل نشست‌های مجاز در طول پروژه با درنظر گرفتن تمامی عوامل محیطی ارائه گردد.

معرفی مطالعه‌ی موردی

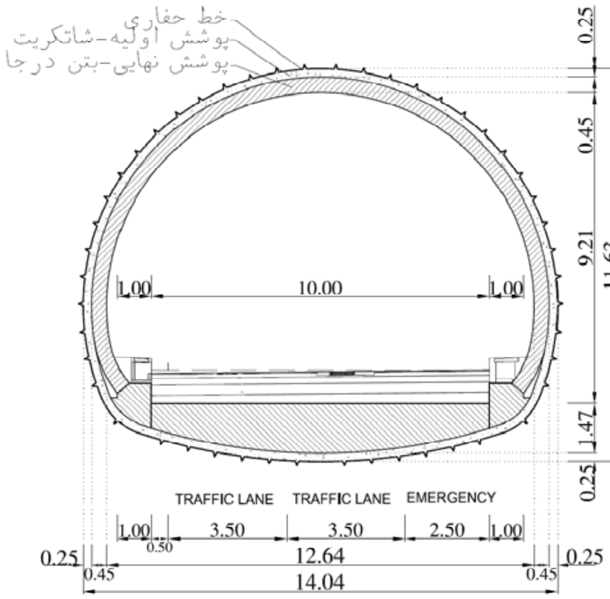
به‌منظور اتصال بزرگ‌راه نیایش به بزرگ‌راه صدر در شهر تهران، احداث دو تونل، هرکدام به‌طول تقریبی ۳ کیلومتر پیش‌بینی شده است. هر یک از تونل‌ها در بعضی از قسمت‌ها شامل ۳ خط ترافیکی و در بعضی از قسمت‌ها شامل ۲ خط ترافیکی هر کدام به عرض ۳/۵ متر، یک خط ترافیک ضروری به عرض ۲/۵ متر و یک خط پیاده‌روی یک‌متری در دو طرف می‌باشد؛ بدین معنی که در قسمت‌های سه‌خطه، تونلی با عرض تقریبی ۱۷ متر و در قسمت‌های دوخطه، تونلی با عرض تقریبی ۱٤ متر احداث خواهد شد. این تونل‌ها به‌صورت رفت و برگشت در دو تونل مجزای شمالی و جنوبی، انتهای بزرگ‌راه کردستان را به ابتدای بزرگ‌راه صدر متصل می‌کنند [۱۳]. شکل (۱) موقعیت تقریبی پروژه به‌همراه مسیر یاد شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تونل در بخش میانی خود از دو خیابان مهیار و ناهید با بافت مسکونی عبور می‌کند. با توجه به پلان و پروفیل مسیر، این تونل در مناطقی با روباره و فاصله‌ی کم از مجاورت ساختمان‌های مسکونی چندطبقه عبور می‌کند. در این تحقیق برای بررسی وضعیت سازه‌های سطحی در مجاورت تونل یک ساختمان ۷ طبقه در خیابان مهیار که در سمت جنوبی تونل شمالی قرار گرفته است، به‌عنوان مورد مبنا انتخاب گردیده است. شکل (۲) موقعیت دقیق این ساختمان را در پلان مسیر نشان می‌دهد.

مشخصات سازه‌ای و اجرایی تونل

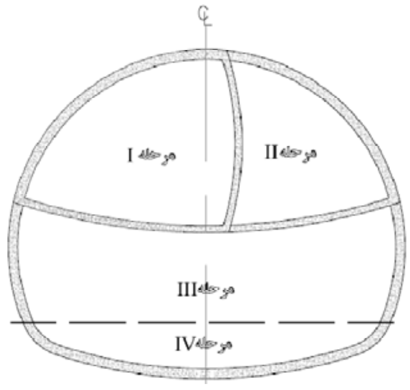
این تونل به روش حفاری مرحله‌ای و در چندین مرحله حفاری و اجرا می‌گردد. شکل هندسی مقطع این تونل دوخطه که از نوع چندقوسی است به‌همراه مراحل حفاری آن در شکل (۲) و شکل (۳) نشان داده شده است. به‌منظور حفاری و ساخت این تونل ابتدا مرحله‌ی یک حفاری می‌شود و سپس پوشش موقت آن اجرا می‌گردد. در مرحله‌ی بعدی، بخش دو از تونل برای تکمیل حفاری بخش فوقانی حفاری می‌گردد و پوشیده می‌شود. به‌همین ترتیب مراحل سوم و چهارم نیز بعد از جمع‌آوری پایه‌های میانی اجرا شده در بخش‌های قبلی، حفاری و اجرا می‌گردند تا تمام مقطع تونل به‌طور کامل حفاری و آماده‌ی اجرای بتن پوشش نهایی گردد.



شکل ۱ موقعیت مطالعه‌ی موردی



شکل ۲ مقطع عرضی تونل مورد بررسی؛ ابعاد به متر [۱۳]



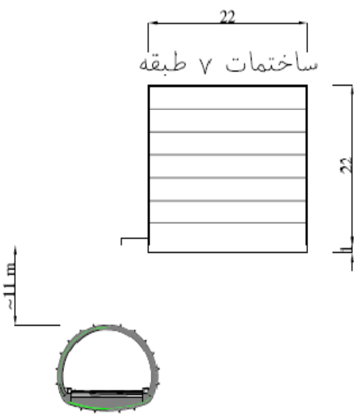
شکل ۳ مراحل اجرا و حفاری تونل

سازه‌ی تونل شامل پوشش موقت و پوشش نهایی می‌باشد. ضخامت شاتکریت که به‌همراه شبکه و قاب‌های میلگردی به‌عنوان سازه‌ی موقت تونل به کار می‌رود، ۲۵ سانتی‌متر است که در تحلیل از خصوصیات شاتکریت تر که مربوط به شاتکریت با عمر حدود یک روز می‌باشد استفاده شده است. حداکثر تغییر شکل‌های زمین، در هنگام حفاری و اجرای این سازه و تا قبل از اجرای سازه‌ی نهایی اتفاق خواهد افتاد لذا خصوصیات این مصالح در بررسی مقدار تغییرشکل‌ها تاثیرگذار خواهد بود. سازه‌ی نهایی تونل نیز پوشش بتن درجای ٤٥ سانتی‌متری است که بر روی دو تیر طولی که در طرفین دال کف قرار گرفته است ساخته می‌شود. جدول (۱) خصوصیات سازه‌ای را که در تحلیل‌ها برای سازه‌ی موقت و ساختمان موجود استفاده شده است نشان می‌دهد.

جدول ۱ خصوصیات و پارامترهای سازه‌ای تونل و ساختمان

پارامترها	مقادیر
ضخامت پوشش اولیه	۲۵ Cm
مدول ارتجاعی شاتکریت	۱۵ Gpa
مدول ارتجاعی بتن ساختمان	۲۵ Gpa
ابعاد ستون‌های ساختمان	۸۰X۸۰ Cm
ابعاد تیرهای ساختمان	۵۰X۵۰ Cm
ضخامت فونداسیون ساختمان	۱۰۰Cm

عملیات حفاری و ساخت تونل با ساختمان‌های مسکونی آن منطقه که عمدتاً آپارتمان‌های سه‌طبقه به بالا می‌باشند تلاقی خواهد داشت. با توجه به روش اجرای این تونل‌ها که روش حفاری مرحله‌ای می‌باشد ایجاد تغییر مکان در توده‌ی خاک و در نتیجه نشست در سطح زمین در مجاورت سازه‌های سطحی امری غیر قابل اجتناب خواهد بود. با این وجود، باید با توجه به ظرفیت و تحمل سازه‌های سطحی در برابر نشست، روش اجرا و گام‌های حفاری کنترل‌شده انجام گردد. در این پروژه تونل شمالی با عبور از خیابان مهیار با روباره‌ی تقریبی ۱۱ متر از زیر ساختمان ۷ طبقه‌ای عبور خواهد کرد. شکل (٤) موقعیت تقریبی این تونل و ساختمان سطحی را که به‌عنوان نمونه از شرایط واقعی مطالعه‌ی موردی انتخاب شده است نشان می‌دهد.



شکل ٤ موقعیت ساختمان مسکونی نسبت به تونل [۱۳]

مشخصات ژئوتکنیکی منطقه

به‌طور کلی خاک منطقه از شن ماسه‌ای متراکم و ماسه‌های متراکم تشکیل شده است که هر دوی آن‌ها دارای مقداری سیلت و رس هستند (GC, GM, SC, SM). این خاک‌ها حاوی مقادیر مختلفی (۵ تا ۵۰ درصد) از مصالح ریزدانه می‌باشند. به‌علاوه میان لایه‌های سیلتی و رسی نیز در برخی مناطق گمانه‌ها

مشاهده شده است. با توجه به مطالعات ژئوتکنیک انجام‌شده، تراز آب پایین‌تر از تراز عملیاتی می‌باشد و پارامترهای ارائه‌شده در جدول (۲) برای انجام تحلیل‌های عددی استفاده شده است.

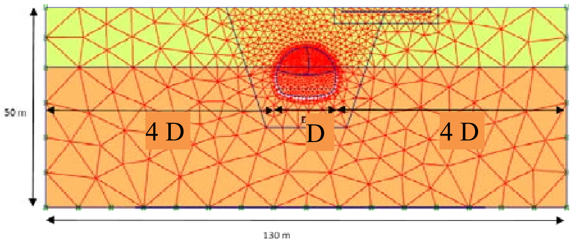
جدول ۲ خصوصیات ژئوتکنیکی خاک محل [١٤]

	ارتفاع	وزن مخصوص kN/m³	مدول ارتجاعی MN/m²	چسبندگی kN/m²	زاویه‌ی اصطکاک deg
لایه۱	۰تا۱۵	۱۸	۸۰/۷	۳۰	۳٤
لایه۲	۱۵<	۱۸	۹٤/۲۰	٤۰	۳٦

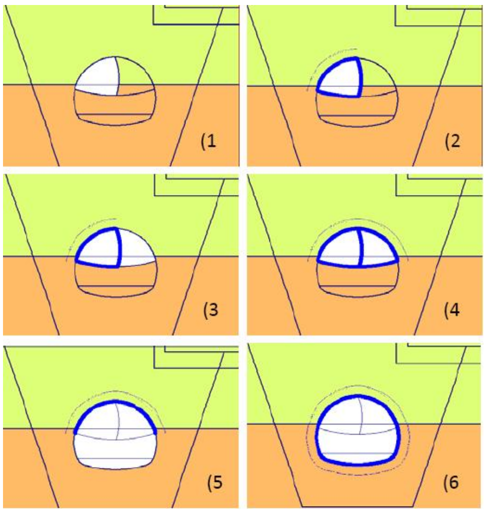
مدل عددی و روش تحلیل

مدل عددی. در این تحقیق به‌منظور بررسی رفتار ساختمان‌های سطحی در حین حفاری و ساخت تونل‌های زیرزمینی با توجه به مشخصات ارائه‌شده برای تونل نیایش– صدر، از نرم‌افزار اجزای محدود PLAXIS 2D استفاده شده است. در این نرم افزار تونل و محیط اطراف آن با توجه به مشخصات ارائه‌شده در قسمت قبل در ابعاد ۱۳۰X۵۰ متر مدل شد و مش بندی آن به‌گونه‌ای انجام گرفت تا در محل‌هایی که دارای حساسیت بالایی از نظر تحلیل می‌باشند ابعاد مش‌ها کوچک‌تر باشد. در مدل عددی برای مش‌بندی از المان‌های مثلثی ١٦ گره‌ای استفاده شده است. مرزهای افقی برای عدم تأثیر بر نتایج تحلیل در محدوده‌ی تونل در فاصله‌ی 4D از دیواره‌ی تونل قرار گرفته‌اند. شکل (٥) هندسه‌ی مدل ایجادشده برای تحلیل را نشان می‌دهد.

نحوه‌ی اعمال مراحل اجرای تونل به مدل با توجه به شکل (۳) در شکل (٦) نشان داده شده است. در مدل ساخته شده، به‌منظور لحاظ کردن اثرات سه‌بعدی حفاری در مدل دوبعدی، از روش آزادسازی تنش β (Stress relaxation) استفاده شده است. بدین معنی که در مرحله‌ی حفاری هر بخش (β−۱) برابر کل فشار وارد شده و مابقی (β) به مدل بعد از ساخت سازه‌ی موقت اعمال می‌شود.

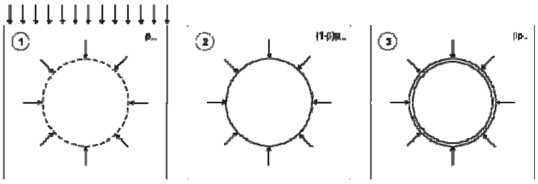


شکل ٥ مدل عددی زمین بکر قبل از حفر تونل به‌همراه مش‌بندی

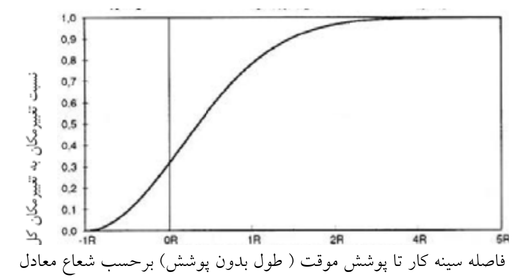


شکل ٦ نحوه‌ی مدل‌سازی مراحل اجرای تونل

نحوه‌ی اعمال بارها و آزادسازی تنش در شکل (۷) نشان داده شده است. مقدار β یک داده‌ی تجربی است که کاملاً وابسته به طول پایدار نشده‌ی حفاری و قطر حفاری و شعاع معادل حفاری می‌باشد. در مدل موجود، این مقدار بر اساس کنترل سیکل‌های تحلیل و هم‌گرایی مدل صورت گرفته است. در این خصوص از منحنی پانه برای تعیین نسبت تغییرمکان به تغییرمکان کل با توجه به گام حفاری کمک گرفته شده است [15]. برای این امر با توجه به نسبت طول حفاری به شعاع، نسبت تغییرمکان سینه‌ی حفاری به کل تغییرمکان برابر ۰/٥ به‌دست آمده است. بر این اساس مقدار آزادسازی تنش برای مراحل مختلف β=0.5 انتخاب شده است. بدین معنی که نصف تنش‌ها قبل از نصب پوشش آزاد می‌شود.



شکل ۷ مراحل اعمال بار و نحوه‌ی مدل‌سازی آزادسازی تنش



شکل ۸ منحنی پانه برای محاسبه‌ی نسبت تغییرمکان [15]

در تمامی مدل‌های عددی، مدل ساختاری مصالح خاک، مدل موهر- کولمب و رفتار اجزای سازه‌ای مانند شاتکریت، تیر، ستون و فونداسیون ساختمان به‌صورت ارتجاعی خطی اختیار شده است. پارامترهای مورد استفاده برای مدل‌های رفتاری در جداول (۱) و (۲) ارائه گردیده است. هم‌چنین برای لحاظ کردن اثر اندرکنشی بین شاتکریت و خاک، از المان فصل مشترک در اطراف شاتکریت در سمت خاک استفاده شده است. این المان فصل مشترک در شکل (٦) به‌صورت خط‌چین در تمامی مراحل نمایش داده شده‌است.

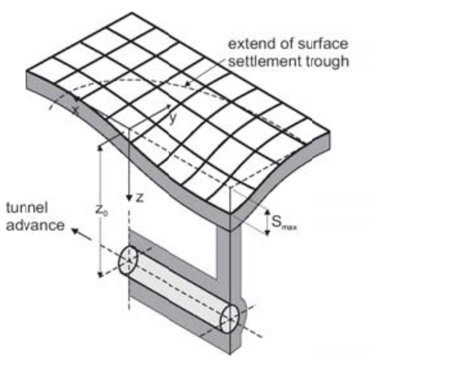
هدف اصلی این تحقیق یافتن درجه‌ی اهمیت لحاظ کردن اندرکنش تونل و سازه‌ی سطحی در پروژه‌ی تونل نیایش-صدر می‌باشد. بدین منظور انجام تحلیل‌های اندرکنشی به مدل زمین بکر، فونداسیون نواری به ارتفاع و عرض ۱ متر و به طول ۲۲ متر در موقعیت ساختمان ۷ طبقه اضافه شده است. در این خصوص نوارهای فونداسیون عمود بر محور تونل‌اند و در راستای دیگر با شناژ به یکدیگر متصل هستند. در این حالت اثر سختی فونداسیون بر پروفیل نشست سطح و نیز تغییرشکل فونداسیون مورد بررسی قرارمی‌گیرد.

ارزیابی نشست در حالت زمین آزاد با روابط حل بسته

در حالت مدل پایه یعنی مدل زمین بکر علاوه بر تحلیل‌های عددی، پروفیل نشست سطح زمین در مقطع عرضی با استفاده از روابط نیمه‌تجربی برای مقایسه با نتایج مدل عددی به‌دست می‌آید. در این روش محققانی چون Peck و سایرین نشان می‌دهند که می‌توان منحنی نشست سطح زمین در اثر اجرای تونل را به‌وسیله‌ی منحنی توزیع گوسی (Gaussian Distribution Curve) مطابق زیر نمایش داد:

$$S_V = s_{max} \exp\left(\frac{-y^2}{2i^2}\right) \qquad (۱)$$

که در آن S_V نشست قائم در فاصله‌ای مشخص نسبت به محور تونل، S_{max} حداکثر نشست قائم روی محور تونل، y فاصله‌ی افقی از محور تونل و i فاصله‌ی افقی از محور تونل تا نقطه‌ی عطف منحنی کاسه نشست می‌باشد. شکل (۹) نحوه‌ی تغییر شکل سطح زمین را در هنگام عبور تونل از زیر آن و هم‌چنین محل ایجاد حداکثر تغییرمکان را نشان می‌دهد. کاهش حجم مقطع تونل در اثر تغییرمکان خاک و هم‌چنین تغییرشکل مقطع عرضی تونل نیز در شکل (۱۰) ارائه شده است.



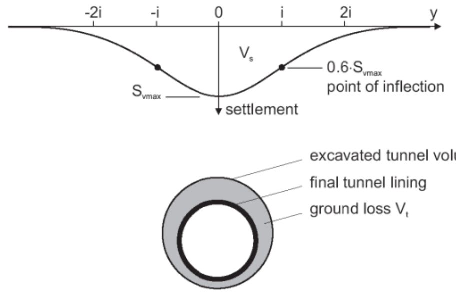
شکل ۹ کاسه نشست در سطح زمین در اثر اجرای تونل [5]

برای محاسبه‌ی حداکثر نشست روابط زیر ارائه گردیده است [5].

$$S_{max} = V_s / i\sqrt{2\pi} \qquad (۲)$$

$$V_s = V_l \frac{\pi D^2}{4} \qquad (۳)$$

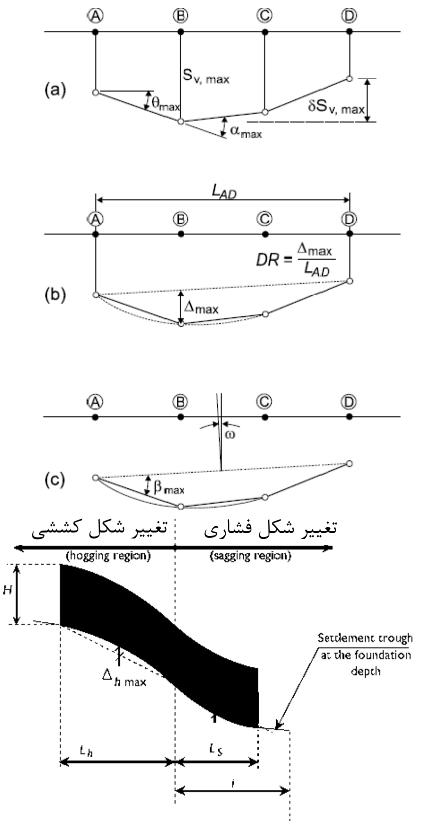
در این روابط V_s حجم کاسه نشست پدیدآمده در سطح زمین در واحد متر تونل می‌باشد که در شکل (۱۰) نشان داده شده است. این مقدار به ضریب کاهش حجم تونل در اثر حفاری وابسته می‌باشد.



شکل ۱۰ مقطع عرضی نشست در زمین در اثر اجرای تونل [5]

ارزیابی مقادیر مجاز تغییرمکان در حین حفاری

حفاری تونل‌ها در محیط شهری به روش حفاری مرحله‌ای همراه با ایجاد تغییرشکل در اطراف تونل و سطح زمین همراه است. این تغییرشکل‌ها زمانی که در مجاورت سازه‌های سطحی و یا تأسیسات زیرزمینی ایجاد می‌گردد، می‌تواند در صورت تجاوز از مقدار مشخصی باعث ایجاد خسارت گردد. در پروژه‌ی حاضر با توجه به عبور تونل از نزدیکی ساختمان‌های مسکونی، باید با ارزیابی مقدار نشست‌های تحمیلی به سطح زمین و در نتیجه به ساختمان، مقدار اهمیت و خسارت‌پذیری این ساختمان‌ها مشخص گردد. به‌منظور ارزیابی نشست‌های مجاز روش‌های متنوعی توسط محققان مختلف ارائه شده است. در این میان می‌توان به روش‌های ارائه شده در آیین‌نامه‌ی طراحی و ساخت تونل‌های راه FHWA [16] اشاره کرد. در این آیین‌نامه دو معیار اعوجاج زاویه‌ای و نیز حداکثر نشست ساختمان برای ارزیابی وضعیت ارائه شده است. جدول (۳) این معیارها را بیان می‌کند. در این جدول β_{max} میزان اعوجاج حداکثر ایجادشده در فونداسیون و S_{max} نیز حداکثر تغییرمکان نسبی دو نقطه از فونداسیون نسبت به هم می‌باشد. شکل (۱۱) نحوه‌ی محاسبه‌ی این مقادیر را نشان می‌دهد. در این شکل پارامترهای α و θ اعوجاج زاویه‌ای نقطه‌به‌نقطه‌ی فونداسیون را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که نحوه‌ی تغییرشکل فونداسیون به موقعیت قرارگیری آن در برابر تونل وابسته است که می‌تواند در صورت قرارگیری در زیر تونل در منطقه‌ی فرونشستگی (Sagging) و یا در صورت قرارگیری در کنار تونل در منطقه‌ی تغییرشکل تحدبی (Hogging) قرار داشته باشد. در منطقه‌ی فرونشستی تراز قرارگیری فونداسیون بر روی خاک به فشار و در منطقه‌ی تحدبی به کشش می‌باشد. شکل (۱۱) نحوه‌ی تغییرشکل یک فونداسیون را در اثر حفاری تونل نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با توجه به موقعیت فونداسیون نسبت به مرکز تونل مناطق فرونشستی و تحدبی مشخص گردیده است. از آن‌جا که در پروژه‌ی حاضر ساختمان در مجاورت تونل در سطح می‌باشد، لذا شرایط تحدبی ملاک است.



شکل ۱۱ نحوه تغییرشکل فونداسیون و نحوه محاسبه اعوجاج [5]

نتایج تحلیل‌ها

تحلیل‌های عددی انجام گرفته در این تحقیق شامل مدل‌های مبنای اندرکنشی و مدل‌های آنالیز حساسیت می‌باشد. در ابتدا مدل زمین بکر به‌همراه فونداسیون، بار و سازه مورد تحلیل قرار خواهند گرفت. سپس برای مشخص شدن اثر موقعیت قرارگیری ساختمان، مدل با بار و فونداسیون در فواصل مختلف نسبت به محور تونل تحلیل و نتایج ارائه می‌گردد. سپس با توجه به تغییرشکل‌های ایجادشده در زمین تأثیر حفاری در حالت زمین بکر و اثر سازه برای ارزیابی وضعیت خسارات ارائه گردیده است. در انتها، نتایج آنالیز حساسیت بر روی ضریب آزادشدگی تنش ارائه خواهد شد.

از آن‌جا که مدل‌های پایه همه براساس شرایط واقعی مورد اشاره شده در تونل نیایش-صدر انتخاب شده‌اند، در آنالیزهای حساسیت نیز تلاش شده است تا متغیرهای موجود در طول این تونل در سایر مقاطع مورد بررسی قرار گیرد.

جدول ۳ مقادیر اعوجاج زاویه‌ای مجاز در ساختمان‌ها به‌همراه مقادیر نشست مجاز و نحوه‌ی خسارت [16]

اعوجاج زاویه‌ای	تقسیم‌بندی پتانسیل خسارت
۱/۷۵۰	خطر برای ماشین‌آلات حساس به نشست
۱/۶۰۰	خطر برای قاب‌ها با اعضای قطری
۱/۵۰۰	حد اطمینان برای عدم ترک‌خوردگی ساختمان
۱/۳۰۰	ایجاد اولین ترک‌های دیوارهای پانلی
۱/۳۰۰	ایجاد مشکل برای جرثقیل‌های با بار زیاد
۱/۲۵۰	کج‌شدگی قابل مشاهده ساختمان‌های صلب
۱/۱۵۰	ترک‌های قابل‌ملاحظه در دیوارهای پانلی و آجری
۱/۱۵۰	خطر خسارات سازه‌ای به ساختمان‌های عمومی
۱/۱۵۰	حد اطمینان برای دیوارهای آجری منعطف

پارامترهای کنترلی		توزیع خسارات معمول	درجه شدت	تقسیم بندی خطر آسیب	سطح خطر
S_{max}(mm)	β_{max}				
<۱۰	<۱/۵۰۰	خسارات غیرمحتمل سطحی	ناچیز	ظاهری	۱
۱۰-۵۰	۱/۵۰۰-۱/۲۰۰	خسارات محتمل سطحی که منجر به خسارات سازه‌ای نمی‌شود	سبک	ظاهری	۲
۵۰-۷۵	۱/۲۰۰-۱/۵۰	خسارات سطحی مورد انتظار و آسیب به ساختمان و خطوط لوله‌ی صلب	معمولی	پایه‌ای	۳
>۷۵	>۱/۵۰	خسارات سازه‌ای مورد انتظار و آسیب به سایر خطوط لوله	زیاد	ساختاری و بهره‌برداری	۴

نتایج تحلیل مدل‌های پایه در مدل‌های پایه در چهار گروه زیر انجام گردیده است:

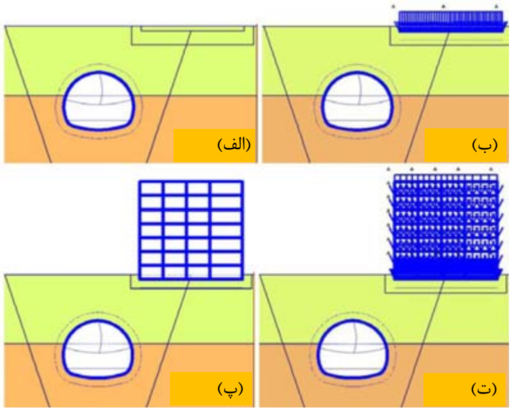
۱- ***تحلیل اندرکنشی تونل فونداسیون سازه با در نظر گرفتن اثرات وزن سازه.*** در این تحلیل علاوه بر لحاظ کردن سختی فونداسیون، وزن سازه‌ی سطحی قبل از انجام تحلیل‌های حفاری تونل به فونداسیون اعمال شده و سپس پروفیل‌های نشست سطح زمین محاسبه شده است. با توجه به شرایط واقعی مطالعه‌ی موردی، سختی فونداسیون‌ها به‌صورت نواری در تحلیل‌ها وارد شده است. این فونداسیون‌ها دارای عرض ۱۲۰ سانتی‌متر هستند که در فواصل ۵ متری از هم قرار دارند و به‌صورت مقطع معادل در مدل اعمال گردیده‌اند (شکل ۱۲-ب). نتایج این مدل، با عنوان Tunnel-Foundation-Load ارائه شده است.

۲- ***تحلیل اندرکنشی تونل- فونداسیون و سازه سطحی.*** در این تحلیل، سازه‌ی هفت طبقه با خصوصیات موجود در پروژه به مدل قبلی اضافه شده است. در این قسمت به‌منظور ارزیابی میزان تأثیر سختی سازه، اثر وزن لحاظ نگردیده است (شکل۱۲-پ). نتایج این مدل با عنوان Tunnel-Foundation-Structure ارائه شده است.

۳- ***تحلیل اندرکنشی تونل- فونداسیون و سازه‌ی سطحی با در نظر گرفتن وزن سازه.*** در این تحلیل علاوه بر مدل کردن خود سازه، بار بهره‌برداری آن نیز به مدل برای درنظر گرفتن همه‌ی پارامترهای تأثیرگذار اضافه شده است. این مدل کامل‌ترین مدل در بخش مدل‌های پایه خواهد بود. شکل زیر انواع مدل‌های پایه‌ی به‌کار رفته در تحلیل را نشان می‌دهد (شکل ۱۲-ت). نتایج این مدل با عنوان Tunnel-Foundation-Load-Srtucture ارائه شده است.

جهت مدل کردن اجزای ساختمان از المان‌های تیری (beam) استفاده شده است که در محل تماس آن‌ها با خاک مانند فونداسیون، المان فصل مشترک نیز با توجه به خصوصیات اصطکاکی بتن و خاک استفاده شده است.

تحلیل مدل عددی زمین بکر به این دلیل انجام می‌گردد تا در مرحله‌ی اول مشخص گردد که روش حفاری و مراحل اجرای تونل باعث ایجاد چه تغییراتی در سطح زمین می‌گردند.



شکل ۱۲ انواع مدل‌های پایه

یکی از روش‌های ارزیابی مقدار خسارت‌های وارد شده بر سازه‌های سطحی ناشی از عملیات حفاری تونل، برآورد نحوه‌ی خسارت و صدمات وارد شده به سازه بر اساس نشست‌های پیش‌بینی شده از تحلیل‌های زمین بکر می‌باشد. این نوع تحلیل‌ها مستقل از نوع سازه و شرایط سطح زمین می‌باشند لذا برای تخمین اولیه بسیار کارآمد می‌باشند. روش معمول در این گونه تحلیل‌ها به این صورت است که نشست‌های به‌دست آمده از تحلیل زمین بکر در مدلی مجزا به سازه اعمال می‌شود و ظرفیت سازه در برابر این نشست‌ها ارزیابی می‌گردد. نتایج عمومی تحلیل مدل برای حالت زمین بکر به روش عددی و با کمک روابط حل بسته (روابط نیمه‌تجربی) برای مطالعه‌ی موردی عنوان شده در ادامه ارائه شده است.

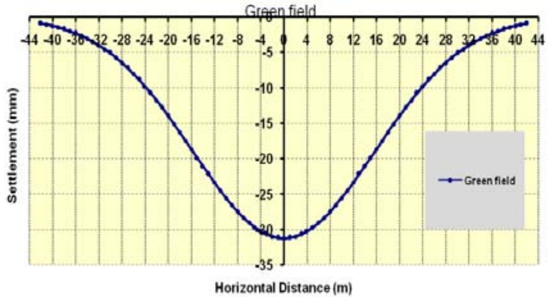
به منظور به‌دست آوردن پروفیل تغییرشکل زمین با استفاده از روابط نیمه‌تجربی باید مطابق روابط (۲) و (۳) مقادیر قطر معادل تونل (D)، فاصله افقی از محور تونل تا نقطه‌ی عطف منحنی نشست (i) و همچنین

مقدار ضریب کاهش حجم تونل (Vl) در اثر حفاری که وابسته به جنس زمین است، مشخص باشد. با توجه به قطر حفاری حدود ۱٤ متری تونل، کیفیت حفاری و نیز نوع خاک موجود در پروژه، موارد زیر برای i پیشنهاد شده است [5].

$$i = 2.5 \times D \times 0.45 = 15.75$$

با توجه به رابطه (۲) و (۳) مشخص می‌شود که حداکثر نشست سطح به حجم کاسه نشت و این حجم نیز به ضریب کاهش حجم (Vl) وابسته است.

با توجه به حداکثر نشست به‌دست آمده و نیز رابطه‌ی (۱)، می‌توان پروفیل نشست سطح زمین را در فواصل مختلف از مرکز تونل ترسیم نمود. شکل (۱۳)، پروفیل نشست را که از روابط نیمه‌تجربی به‌دست آمده است نشان می‌دهد.



شکل ۱۳ پروفیل نشست کلی در سطح در تحلیل نیمه‌تجربی

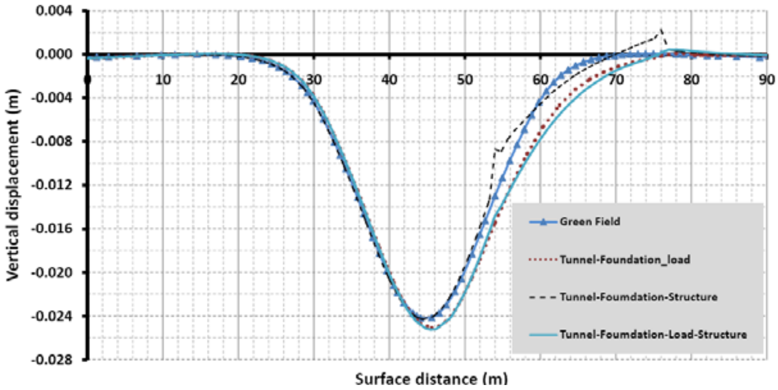
ملاحظه می‌شود که مقدار حداکثر نشست پیش‌بینی شده توسط روابط نیمه‌تجربی برابر ۳۱ میلی‌متر و حدود ۱۵ درصد بیشتر از مقادیر محاسبه شده توسط روش عددی است (شکل ۱٤). باید اشاره کرد که علت این اختلاف را می‌توان در فرضیات روش‌های نیمه‌تجربی یافت. اما نکته‌ی قابل اهمیت در مقایسه‌ی این دو روش در این است که روش نیمه‌تجربی همواره نتایج محافظه‌کارانه‌تری ارائه خواهد داد.

در شکل (١٤) پروفیل نشست سطح زمین در تمامی مدل‌های پایه نشان داده شده است. نتایج مدل را می‌توان در دو ناحیه‌ی حداکثر نشست سطح زمین و نیز نشست زیر موقعیت فونداسیون‌ها مورد بررسی قرار داد. جدول (٤) مقدار تغییرمکان محاسبه شده را به‌همراه اختلاف حداکثر تغییرمکان هر مدل با مدل زمین بکر در تحلیل عددی (Green Field) نشان داده است.

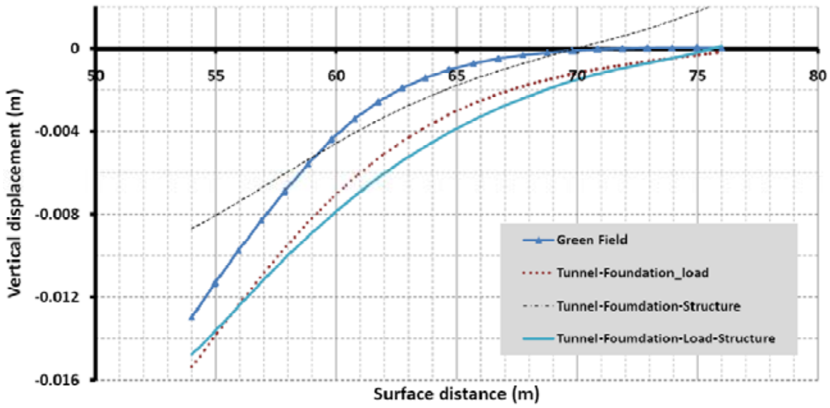
جدول ٤ مقادیر نشست‌های قائم در تحلیل‌های پایه

مدل‌ها	Uy_{max}	اختلاف ٪
Green field	۰/۰۲٤۲	۰/۰
Tunnel-Foundation-Load	۰/۰۲۵۱	۳/۸
Tunnel-Foumdation-Structure	۰/۰۲٤۳	۰/٤
Tunnel-Foumdation-Load-Structure	۰/۰۲۵۳	٤/۵

اختلاف بین نشست‌ها با مدل زمین بکر در حالتی که بار، فونداسیون و همچنین سازه به مدل اضافه شده‌اند همواره بیشتر شده است و بیانگر آن است که همواره لحاظ کردن اثر سختی فونداسیون، سختی سازه و نیز وزن ساختمان باعث افزایش مقدار نشست‌های حداکثر در محور تونل می‌شود. هم‌چنین در موردی که فقط اثر سختی‌های فونداسیون و سازه دیده می‌شود و اثر وزن لحاظ نشده است، اختلاف نشست‌ها با حالت زمین بکر بسیار اندک است. از آن‌جا که همواره بیشترین تأثیرات در خصوص نشست‌ها متوجه فونداسیون و سازه می‌باشد لذا بررسی رفتار دقیق‌تر نشست‌ها در محدوده‌ی فونداسیون انجام پذیرفته است. شکل (١٥) نحوه‌ی تغییرشکل قائم فونداسیون در شرایط متفاوت تحلیل مدل‌های مبنا و جدول (٥) مقادیر این نشست‌ها را نشان می‌دهد. به منظور بررسی دقیق‌تر این موضوع، اثر مدل‌های مختلف پایه در نتایج تحلیل به‌صورت موردی بررسی می‌شود.



شکل ۱۴ پروفیل نشست کلی در سطح زمین در تحلیل‌ها



شکل ۱۵ پروفیل نشست در موقعیت فونداسیون در تمام تحلیل‌ها

جدول ۵ مقادیر نشست‌های قائم و اعوجاج در زیر فونداسیون در تحلیل‌های پایه

مدل‌ها	نشت (mm)	اختلاف	اعوجاج	اختلاف
Green field	۱۳/۰	۰/۰	۵/۹E-۴	۰/۰
Tunnel-Foundation-Load	۱۵/۴	۱۸/۵	۵/۲E-۴	-۱۱/۴
Tunnel-Foundation-Structure	۸/۷	-۳۲/۹	۱/۴E -۴	-۷۶/۹
Tunnel-Foundation-Load-Structure	۱۴/۸	۱۴/۰	۴/۱E-۴	-۳۰/۷۰

در این جدول، ستون نشست‌ها مربوط به حداکثر نشست سطح در زیر فونداسیون است و ستون اختلاف‌ها، به‌ترتیب مربوط به اختلاف نشست حداکثر با مدل زمین بکر (Green field) و اختلاف اعوجاج زاویه‌ای (β) با همین مدل می‌باشد. مقادیر اعوجاج زاویه‌ای مطابق نحوه‌ی ارائه شده در شکل (۱۱) محاسبه شده است.

با دقت در نتایج حداکثر تغییرمکان قائم ایجاد شده مشخص می‌گردد که با اعمال وزن ساختمان به‌همراه سختی فونداسیون مقادیر نشست به ۱۵/۴ میلی‌متر افزایش یافته به‌طوری‌که نسبت به حالت زمین بکر ۱۸/۵٪ بیشتر شده است. این وضعیت در خصوص مدل با لحاظ کردن سختی فونداسیون، سازه و نیز وزن ساختمان نیز به‌طور مشابه دیده می‌شود که نشان می‌دهد نتایج نشست در مدل با شرایط ایده‌آل (مدل با در نظر گرفتن اثر وزن، فنداسیون و سازه) همواره از

مقادیر نشست زمین بکر که عموماً معیاری برای ارزیابی اولیه می‌باشد بیشتر است. در تحلیلی دیگر سختی فونداسیون و سازه بدون اثر وزن ساختمان لحاظ گردیده است که نشان از کاهش ۳۳ درصدی نشست‌ها در مقایسه با حالت زمین بکر دارد.

این تحلیل صرفاً برای مشخص کردن اثر سختی سازه و فونداسیون ارائه گردیده است و نشان می‌دهد که لحاظ کردن اثر سختی سازه و فونداسیون می‌تواند نتایج تغییرمکان‌ها را به‌مقدار زیادی کاهش دهد. هم‌چنین با مقایسه‌ی نتایج مدل‌هایی که اثر وزن ساختمان در آن‌ها دیده شده است می‌توان دریافت که همواره اثر وزن است که باعث افزایش مقادیر نشست میگردد. این موضوع باعث می‌گردد که مدل‌های زمین بکر جواب‌هایی خلاف جهت اطمینان در این خصوص ارائه دهند. بدین معنی که لحاظ کردن اثر وزن باعث افزایش نشست‌ها و درنظر گرفتن سختی فونداسیون و سازه باعث کاهش نشست‌های فونداسیون خواهد شد. با بررسی این دو مدل می‌توان گفت همواره اثر افزایشی وزن ساختمان تأثیر بیشتری از اثرات اندرکنشی سازه و فونداسیون دارد و به همین دلیل مدل نهایی نیز که شامل تمامی موارد است همواره افزایش نشست حدود ۱۵٪ را نشان می‌دهد.

هم‌چنین مشاهده می‌شود که در تمامی مدل‌های اندرکنشی مقادیر اعوجاج زاویه‌ای نسبت به زمین بکر کاهش یافته‌است به‌طوری‌که لحاظ کردن اثر بار ساختمان به‌همراه سختی سازه و فونداسیون باعث کاهش ۳۰٪ مقادیر اعوجاج گردیده است. در این حالت عدم اعمال بار به مدل‌های اندرکنشی باعث اختلاف بسیار زیاد نتایج با حالت زمین بکر می‌گردد، به طوری‌که در مدلی که فقط سختی‌های فونداسیون و سازه لحاظ گردیده‌است مقدار اعوجاج، نسبت به حالت زمین بکر کاهش ۷۷٪ داشته است. با بررسی نحوه‌ی تغییرات دو پارامتر نشست قائم و نیز اعوجاج زاویه‌ای مشخص می‌گردد که روند یکسانی برای اثر لحاظ کردن سختی‌های سازه و فونداسیون و نیز بار ساختمان نمی‌توان در نظر گرفت.

باید عنوان کرد که همواره نتایج تحلیل مدل‌های واقعی‌تر اندرکنشی با نتایج مدل زمین بکر متفاوت است که این تفاوت در نشست‌ها با افزایش مقدار و در اعوجاج زاویه‌ای با کاهش مقادیر اثر گذاشته است. بدین معنی که در شرایطی که نشست در محدوده‌ی بحرانی است همواره لحاظ کردن اثر سختی‌ها و بار باعث می‌شود تا نتایج مدل زمین بکر خلاف جهت اطمینان باشد اما در شرایطی که مقدار اعوجاج زاویه‌ای فونداسیون حاکم باشد باید دریافت که همواره نتایج زمین بکر محافظه‌کارانه خواهد بود. به‌عبارتی بهتر است از مدل‌های زمین بکر صرفاً در جهت ارزیابی مقدار اعوجاج فونداسیون استفاده شود نه برای تغییرمکان حداکثر آن. این موضوع به محل قرارگیری فونداسیون نسبت به تونل وابسته خواهد بود که در ادامه به بررسی آن پرداخته خواهد شد. اما نکته‌ی دارای اهمیت این است که بر پایه‌ی نتایج تحلیل‌ها نمی‌توان یکی از معیارهای نشست و اعوجاج را به تنهایی برای ارزیابی استفاده کرد و یا یک قانون کلی براساس یکی از معیارها برای تمامی ساختمان‌های مسیر ارائه داد ولی این گونه به‌نظر می‌رسد که لحاظ کردن اثرات سختی سازه و فونداسیون و نیز اثر وزن ساختمان باعث افزایش نتایج نشست‌ها و کاهش مقدار اعوجاج فونداسیون خواهد شد.

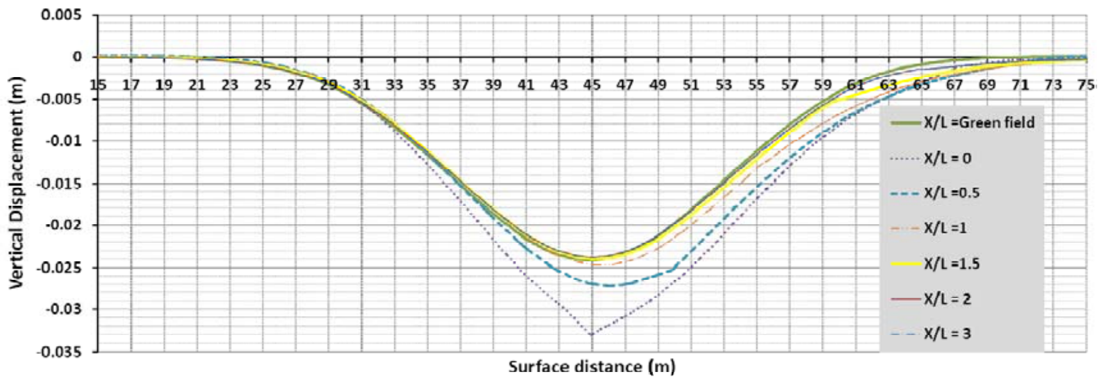
بررسی اثر موقعیت قرارگیری ساختمان

با توجه به این‌که موقعیت ساختمان بر رفتار آن در برابر نشست‌های ناشی از تونل‌سازی تأثیر گذار خواهد بود، در این قسمت اثر فاصله‌ی استقرار فونداسیون از مرکز تونل بررسی خواهد شد. در این بررسی طول فونداسیون ثابت و مطابق مطالعه‌ی موردی برابر ۲۲ متر فرض گردیده است. فونداسیون فرض شده نواری در راستای عمود بر محور تونل می‌باشد که با شناژهای

عرضی در راستای دیگر به‌هم متصل شده‌اند. در این بررسی با توجه به روباره‌ی ۱۰ متری تونل در مقطع مورد نظر فواصل بین فونداسیون و مرکز تونل برابر X/L=0, 0.5 , 1 , 1.5 , 2 ,3 انتخاب گردیده است که در آن X فاصله‌ی گوشه‌ی پی تا محور تونل و L مقدار روباره تونل می‌باشد. شکل (١٦) نحوه‌ی تغییرشکل سطح زمین در شش وضعیت قرارگیری ساختمان نسبت به مرکز تونل را نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشخص است مقدار تغییرشکل‌های قائم در محور تونل با افزایش نسبت فاصله به عمق افزایش می‌یابد. این افزایش در خصوص نسبت صفر کاملاً مشهود است به‌طوری‌که حضور فونداسیون در سمت راست تونل بر پروفیل نشست سطح زمین در سمت چپ نیز تأثیرگذار بوده است. جدول (٦) نتایج تحلیل‌ها را برای موقعیت‌های مکانی متفاوت فونداسیون از نظر نشست قائم، اعوجاج زاویه‌ای و نهایتاً مقایسه‌ی آن‌ها با مدل زمین بکر نشان می‌دهد.

همان‌طور که عنوان شد مقدار نشست‌های قائم سطح در محور تونل و نیز در زیر فونداسیون از نسبت ابعادی ١/٥ به بعد تقریباً ثابت است و با اختلاف کمتر از ٥٪ می‌توان آن را برابر نتایج تحلیل زمین بکر دانست. بدین معنی که اگر تونل در شرایط مسیر در مطالعه‌ی موردی یاد شده از مجاورت ساختمانی با فاصله‌ی بیشتر از ١/٥ برابر روباره‌ی خود عبور کرد می‌توان اطمینان حاصل نمود که حفاری‌ها تغییری در وضعیت نشست‌های ساختمان نخواهد داشت. برای مشاهده‌ی دقیق‌تر وضعیت فونداسیون‌ها شکل (١٧) نحوه‌ی تغییرشکل قائم آن‌ها را در یک موقعیت نشان می‌دهد تا امکان مقایسه‌ی وضعیت اعوجاج آن‌ها فراهم باشد.



شکل ١٦ پروفیل نشست سطح زمین در تحلیل‌ها با موقعیت‌های متفاوت ساختمان

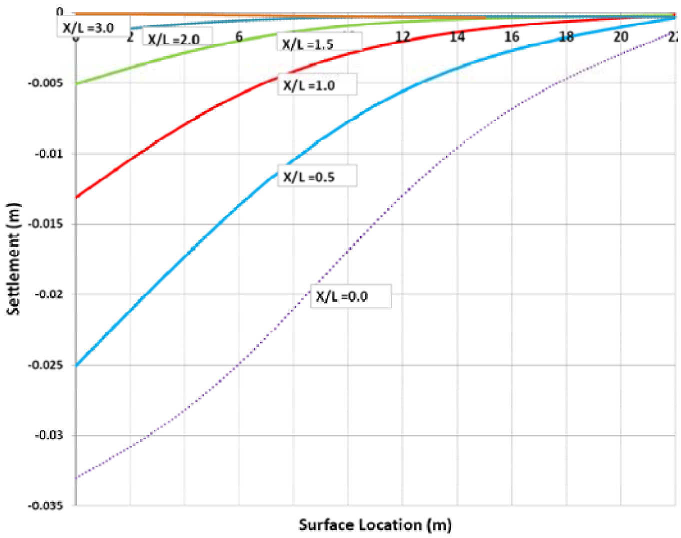
جدول ٦ مقادیر نشست‌های قائم و اعوجاج در زیر فونداسیون در تحلیل‌ها با موقعیت‌های متفاوت ساختمان نسبت به مرکز تونل

مدل‌ها	نشست سطح (mm)	اختلاف ٪	نشست حداکثر پی (mm)	اختلاف ٪	اعوجاج	اختلاف ٪
Green field	۲٤/۲					
X/L = 0	۳۳/۰	۳۷	۳۳/۰	۳٦/۸	٥/۹E-٤	-۲۱/۳
X/L = 0.5	۲۷/۲	۱۳	۲٥/۱	۲۷/۱	۷/٥E-٤	-۸/٥
X/L = 1	۲٤/۷	۲	۱۳/۱	۱۸/۱	٥/۰E-٤	۰/۰
X/L = 1.5	۲٤/۰	-۱	٥/۱	۲٦/٤	۲/۰E-٤	۱۱/۱
X/L = 2	۲۳/۸	-۲	۱/٥	۷۸/۸	٦/۸E-٥	٥۱/۱
X/L = 3	۲۳/٥	-۲	۰/٤	۸۷۱	۰	۰

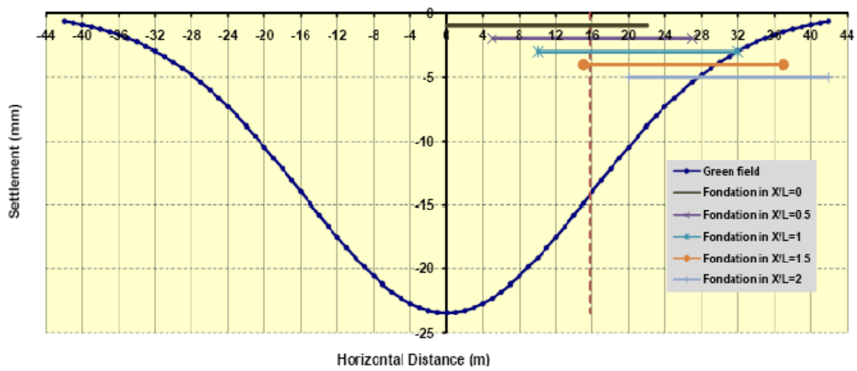
با دقت در جدول (٦) مشخص می‌شود که در حالت X/L=0 که کمترین فاصله را با محور تونل دارد و فونداسیون آن در معرض بیشترین تغییرمکان قرار دارد، بیشترین اعوجاج زاویه‌ای دیده نمی‌شود، بلکه بیشترین اعوجاج مربوط به حالت X/L=0.5 می‌باشد. روند تغییرات نیز نشان می‌دهد که تا فاصله‌ی X/L=0.5 مقدار اعوجاج در حال افزایش است و بعد از آن از مقدار اعوجاج با دور شدن از محور تونل کاسته می‌شود. به‌نظر می‌رسد علت این تغییرات را بتوان در نحوه‌ی تغییرشکل زمین و نیز طول فونداسیون یافت.

همان‌طور که در قسمت قبلی بیان شد زمین بکر تحت حفاری تونل نشستی مطابق منحنی گوسی خواهد داشت که این منحنی دارای یک نقطه‌ی عطف می‌باشد. فاصله‌ی این نقطه عطف در روابط با i نشان داده شده است. بررسی‌های انجام شده بر روی نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که مقدار اعوجاج زاویه‌ای فونداسیون به موقعیت آن در مقابل نقطه‌ی عطف (i) بستگی دارد به‌طوری‌که اگر محور وسط فونداسیون بر محور عبوری از نقطه عطف منحنی در حالت زمین بکر منطبق گردد بیشترین مقدار اعوجاج زاویه‌ای در فونداسیون اتفاق خواهد افتاد. شکل (۱۸) موقعیت قرارگیری فونداسیون‌ها را نسبت به محور عبوری از نقطه‌ی عطف در حالت زمین بکر نشان می‌دهد. در این نمودارها در حالت X/L=0.5 فاصله‌ی مرکز محور منطبق بر مرکز فونداسیون با محور عبوری از نقطه‌ی عطف کمترین مقدار (۲/۵ متر) می‌باشد که بیشترین اعوجاج را داشته است.

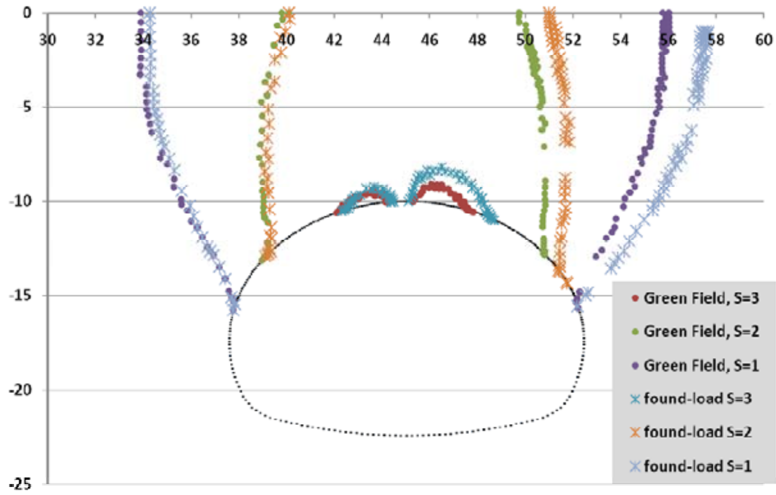
از آن‌جا که همواره در محاسبات اولیه تلاش می‌شود تا ارزیابی اولیه‌ی مقدار خسارت با تحلیل‌های زمین بکر صورت گیرد لذا در این قسمت مقدار اختلاف اعوجاج محاسباتی در مدل فونداسیون و بار با حالت زمین بکر بررسی می‌گردد. در جدول (٦) مقادیر این اختلاف ارائه گردیده است. مشاهده می‌شود که در ۳ مدل ابتدایی همواره مقادیر محاسباتی در تحلیل‌های اندرکنشی اعوجاج‌های کمتری را نسبت به زمین بکر نشان می‌دهند؛ بدین معنی که در صورت استفاده از نتایج روابط زمین بکر جواب‌ها از حاشیه‌ی اطمینان برخوردار خواهد بود. در مدل‌های انتهایی نتیجه عکس می‌باشد؛ بدین معنی که استفاده از روابط حل بسته در محدوده‌هایی از قرارگیری فونداسیون، منجر به جواب‌هایی خلاف جهت اطمینان خواهد شد؛ اگر چه که مقادیر اعوجاج کم است و اهمیت کمتری خواهند داشت.



شکل ۱۷ پروفیل نشست فونداسیون در موقعیت یکسان



شکل ۱۸ موقعیت قرارگیری فونداسیون‌ها در برابر نقطه‌ی عطف و نیز منحنی نشست زمین بکر



شکل ۱۹ حوزه‌ی تأثیر حفاری تونل در عمق ۱۰ متری و اثر لحاظ کردن اندرکنش

بررسی حوزه‌ی تأثیر حفاری

حفاری تونل در محیط‌های شهری و در مجاورت سازه‌ها همواره باعث ایجاد تغییرشکل‌هایی در سطح زمین وساختمان‌ها خواهد شد. مقدار این تأثیرات به مقادیر جابه‌جایی‌های ناشی از عملیات حفاری در محیط اطراف بستگی دارد. در این قسمت با تکیه بر حوزه‌ی تأثیر تونل‌سازی در مطالعه‌ی موردی، اثر لحاظ کردن سختی فونداسیون و بار ساختمان بر شعاع تأثیر نیز دیده شده است. جهت بررسی شعاع تأثیر، خطوط تأثیر حفاری تونل در عمق‌های متفاوت برای تغییرمکان‌های ۱، ۲ و ۳ سانتی‌متر برای دو حالت زمین بکر و نیز برای حالت با اثرات حضور سازه در شکل (۱۹) ترسیم شده است.

نتایج به‌دست آمده در دو حوزه قابل بررسی می‌باشد:

مورد اول تغییرات حوزه‌ی تأثیر با درنظر گرفتن اثر حضور سازه می‌باشد. در مدل با عمق دفن ۱۰ متر به‌علت درنظر گرفتن اثرات حضور سازه کنتورهای نشست‌های قائم در هر دو سمت تونل تغییر یافته است که مقدار این تغییرات در سمت قرارگیری ساختمان بیشتر است به‌طوری‌که لحاظ کردن این اثرات موجب افزایش ۱متری در کنتورهای ۲ سانتی‌متر نشست و ۲ متری در کنتورهای ۱ سانتی‌متر نشست شده است. در این شرایط کنتورهای ۳ سانتی‌متر به سطح زمین نرسیده و فقط منطقه‌ی بالای تونل را پوشش داده‌اند که البته حضور سازه باعث افزایش منطقه‌ی تأثیر آن‌ها نیز شده است. به‌طور کلی به‌نظر می‌رسد با یک حاشیه‌ی

اطمینان بتوان عنوان نمود که لحاظ کردن اثرات سازه منجر به افزایش حدود ۲ متری حوزه‌ی تأثیر تونل‌سازی در مقایسه با حالت زمین بکر در این مورد خواهد شد.

مورد دوم حوزه‌ی تأثیر تونل‌سازی در یک نشست مجاز مشخص می‌باشد. به‌طور مثال اگر نشست ۲ سانتی‌متر برای پروژه نشست مجاز و حداکثر تعریف گردد می‌توان بیان نمود که در صورت عمق دفن ۱۰ متری تونل حوزه‌ی تأثیر آن در سطح زمین برابر ۱۰ متر خواهد بود؛ بدین معنی که در یک محدوده‌ی ۱۰ متری در بالای تونل نباید ساخت و ساز صورت گرفته باشد و به‌عبارت دیگر محدوده‌ی خطر برای ساخت و ساز خواهد بود.

بررسی تغییرات مقدار ضریب آزادشدگی تنش

یکی از پارامترهایی که بر نتایج تحلیل تونل‌ها تأثیر گذار می‌باشد ضریب آزادشدگی تنش است. این ضریب که در حقیقت بیانگر نحوه‌ی عملیات اجرا و نیز گام‌های حفاری می‌باشد بر مقدار نیروهای وارد بر پوشش و هم‌چنین تغییرمکان‌های ایجاد شده مؤثر می‌باشد. مقدار ضریب آزادشدگی تنش در تحلیل‌ها برای هر قسمت حفاری ۰/۵ در نظر گرفته شده است. با توجه به این‌که در این تحقیق مدل‌سازی سه‌بعدی صورت نگرفته است و مقدار این ضریب از روابط تجربی به‌دست آمده است حساسیت نتایج مربوط به لحاظ کردن اثرات سختی سازه و فونداسیون بر روی این پارامتر بررسی می‌شود. مقادیر ۰/٤ و ۰/٦ علاوه بر ضریب ۰/۵ که در تحلیل‌های پایه به‌کار رفته در آنالیز حساسیت استفاده شده است. نتایج مربوط به افزایش نشست‌های فونداسیون نسبت به حالت زمین بکر در جدول (۷) بر حسب ضریب آزادشدگی تنش ارائه شده است.

مشاهده می‌شود هرچه ضریب آزادشدگی تنش افزایش یافته است اختلاف نتایج مدل‌های اندرکنشی با مدل زمین بکر کمتر شده است. این مقدار برای حداکثر ضریب ممکن یعنی ۰/٦ برای مدل نهایی حدود ۱۰ ٪ می‌باشد. با این تحلیل می‌توان بیان نمود که روند نتایج به‌دست آمده مستقل از مقدار ضریب آزادشدگی تنش می‌باشد، بدین معنی که افزایش یا کاهش مقادیر ضریب آزادشدگی تنش، تأثیری در حالت کلی نتایج مدل‌های اندرکنشی نخواهد داشت.

جدول ۷ مقادیر اختلاف نشست با حالت زمین بکر در ضرایب آزادسازی مختلف

مدل‌ها	R=0.4	R=0.5	R=0.6
Tunnel-Foundation-Load	۲۱/۵	۱۸/۵	١٦/٨
Tunnel-Foumdation-Structure	-٤٧/٢	-۳۲/۹	-٤٣/٣
Tunnel-Foumdation-Load-Structure	١٦/٨	١٤/٠	۱۰/۲

راهکارهای پیشنهادی تحقیق

با توجه به نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌های انجام شده در این تحقیق و نیز لزوم ارائه‌ی یک راهکار عملی و ساده برای ارزیابی ساختمان‌های موجود در مسیر ساخت تونل‌های شهری در خصوص آسیب‌پذیری و میزان نشست آن‌ها می‌توان موارد زیر را بر پایه‌ی شرایط و مفروضات تحقیق بیان نمود.

در پروژه‌های بزرگ نظیر تونل نیایش-صدر امکان بررسی و تحلیل تمامی ساختمان‌های موجود در اطراف مسیر نیست و در صورت نیاز به انجام آن نمی‌توان برای هر مقطع از مسیر تمهیدات جداگانه‌ای اختیار کرد. برای سهولت در عملیات اجرا و عدم ایجاد پیچیدگی در مقاطع مختلف بر پایه‌ی مطالب فوق می‌توان روش زیر را برای پروژه‌های مشابه پیشنهاد کرد.

۱- تحلیل زمین بکر برای اعماق دفن مختلف تونل (گام‌های ۵ متری توصیه می‌گردد) صورت پذیرد.
۲- حوزه‌ی تأثیر حفاری تونل برای نشست مجاز مورد نظر پروژه ترسیم می‌گردد.
۳- تحلیل‌های مختلف نشان می‌دهد که همواره لحاظ

کردن اثر سختی سازه و فونداسیون و نیـز اثـر وزن سازه منجر بـه افـزایش ۲ تـا ۳ متـری محـدوده‌ی نشست غیرمجاز در سطح زمین خواهـد شـد. ایـن موضوع در شکل (۱۹) نیز مشـخص مـی‌باشـد. در این شکل منحنی تراز مربوط به نشسـت در حالـت تحلیل زمـین بکـر (Grenn Field, S=2) در سـطح زمین، با منحنی تراز متناظر بـا نشسـت یکسـان در حالت فونداسیون و بار (Found-Load, S=2) ۲ تـا ۳ متر اختلاف دارند. لذا با این فرض منحنی تـراز جدید برای این محدوده ترسیم می‌گردد.

٤– سه ناحیه با رنگ‌های قرمز (ناحیـه‌ی A)، نـارنجی (ناحیه‌ی B) و سبز (ناحیه‌ی C) در حد فاصل ایـن کنتورها مشخص می‌گردد.

شکل (۲۰) این تقسیم‌بندی را برای تونل نیایش– صدر در عمق دفن ۱۰ متری در مجاورت ساختمان بـا فونداسیون نواری نشان می‌دهد. ایـن شـکل بـر مبنـای نتایج تحلیل‌های انجام گرفته و بـا ایـده از شـکل (۱۹) ترسیم شده است. بـا توجـه بـه شـکل (۲۰) مـی‌تـوان این‌گونه بیان نمود که در قسمت‌هایی از مسیر که عمق دفن تونل ۱۰ متر می‌باشد در صـورتی کـه فونداسـیون نواری سازه‌ی سطحی در قسمت قرمز رنگ قرار بگیرد سازه در معرض خطر قـرار دارد و بایـد از روش‌هـای دیگر جلوی تغییـر شـکل فونداسـیون را گرفـت و یـا این‌که مسیر تونل منحرف گردد. این ناحیـه مربـوط بـه نشست‌های بیشتر از نشست مجاز است که قرارگیـری ساختمان در آن قطعاً منجر به ایجـاد خسـارت خواهـد شد. در صورتی که در ناحیه‌ی نارنجی رنگ قرار گیـرد باید تحلیل‌های دقیق‌تر بـا درنظـر گـرفتن اثـر سـختی سازه، فونداسیون و اثر بار صـورت گیـرد تـا وضـعیت نهایی مشخص گردد. این ناحیه مربوط به نشست‌هـایی است که در حالت زمین بکر کمتر از حد مجاز می‌باشد ولی درصورت احداث سازه، منجز به افزایش نشست‌ها و تجاوز آن از حد مجاز خواهد شد. اگر فونداسیون در ناحیه‌ی سبز رنگ قـرار گیـرد نگرانـی خاصـی از نظـر مقدار نشست سازه نخواهد بود و می‌توان تحلیـل‌هـای زمین بکر را مبنا قرار داد.

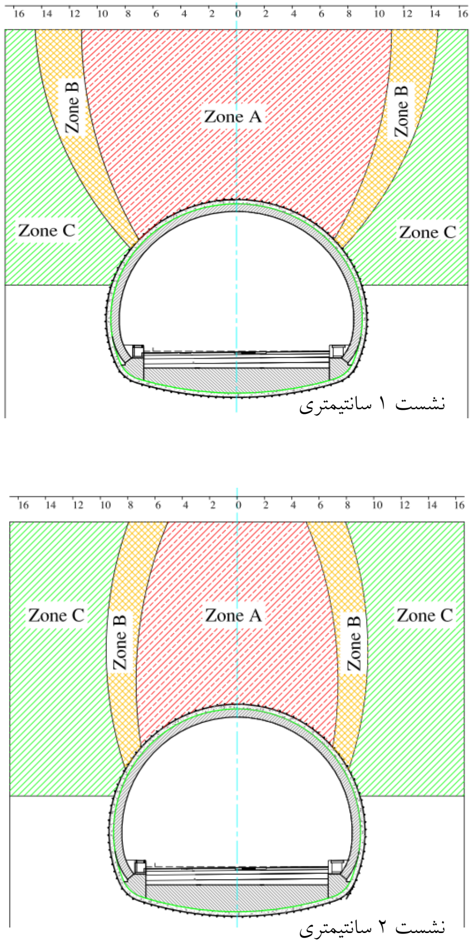
ارائه‌ی معیار کنترلی

اگرچه ساخت مدل‌های پیچیده‌ی اندرکنشی بـا اعمـال تمامی جزئیات، نتایج قابل قبولی برای ارزیـابی مقـدار نشست ساختمان‌هـا در یـک پـروژه خواهـد داد ولـی وجود ساختمان‌ها بـا شـرایط هندسـی مختلـف و نیـز قرارگیری در مکـان‌هـای مختلـف نسـبت بـه تونـل و هم‌چنین شرایط ژئوتکنیکی و هندسی متفاوتی که تونل در طول مسیر خود دارد، انجام تحلیل‌های متنوع و زیاد را غیرممکن می‌نمایـد. بـه‌منظـور مشـاهده‌ی دقیـق‌تـر وضعیت فونداسیون‌ها شکل (۱۷) نحـوه‌ی تغییرشـکل قائم آن‌ها را در یک موقعیت نشان مـی‌دهـد تـا امکـان مقایسه‌ی وضعیت اعوجاج آن‌ها فراهم باشد.

با توجه به تمامی موارد عنوان شده در خصـوص نتایج تحلیل می‌توان پیشنهاد نمـود کـه بـرای ارزیـابی وضعیت ساختمان‌های موجود در مجاورت تونل موارد زیر مدنظر قرار گرفته شود تا بتوان بدون صرف زمان و هزینه‌ی زیاد در خصوص مدل کردن سازه‌های خـاص در پـروژه رویکـردی یکسـان در تمـامی مسـیر ارائـه نمود.

تحلیل زمین بکر برای شـرایط مختلـف ارتفـاعی تونل انجام شود و نتایج تغییر مکان‌های به‌دسـت آمـده از مدل زمین بکـر ۲۰٪ افـزایش یابـد و بـا معیارهـای کنترلی و مقادیر مجاز نشست کنترل گردد.

هم‌زمان با این کنترل به‌طـور توأمـان از نتـایج اولیـه‌ی زمـین بکـر، مقـادیر اعوجـاج بـرای پـی‌هـای معمـول استخراج شود و اگر نسبت فاصله به ارتفـاع روبـاره از گوشه‌ی پی تا مرکز تونل از ۱ کمتر بود، از این مقـادیر بـه‌عنـوان مقـادیر نهـایی اعوجـاج اسـتفاده شـود و در غیر ایـن صـورت مقـادیر اعوجـاج نیـز ۲۰٪ افـزایش یابد و سپس با معیـارهـای کنترلـی آیـین‌نامـه مقایسـه گردد.



شکل ۲۰ ناحیه‌بندی مناطق برای ایمنی ساختمان در مجاورت تونل برای نشست‌های ۱ و ۲ سانتی‌متر

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر اثرات لحاظ کردن اندرکنش تونل با ابنیه‌ی روزمینی مجاور در تحلیل‌های نشست مربوط به سطح زمین و فونداسیون سازه مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق تونل نیایش- صدر و ساختمان هفت طبقه‌ی موجود در مسیر این تونل در خیابان مهیار به‌عنوان مطالعه‌ی موردی انتخاب گردیده است. تحلیل‌های عددی در مدل‌های زمین بکر، تونل- فونداسیون- بار، تونل- فونداسیون- سازه و تونل- فونداسیون- سازه- بار انجام شد که نتایج به‌دست آمده در ادامه ارائه گردیده است.

۱- با توجه به استفاده از نتایج مدل زمین بکر در برآوردهای اولیه می‌توان بیان نمود در شرایطی که نشست در محدوده‌ی بحرانی است همواره لحاظ کردن اثر سختی‌ها و بار باعث می‌شود تا نتایج مدل زمین بکر خلاف جهت اطمینان باشد اما در شرایطی که مقدار اعوجاج زاویه‌ای فونداسیون حاکم باشد باید دریافت که همواره نتایج زمین بکر محافظه‌کارانه خواهد بود.

۲- در پروژه‌های بزرگ تونل‌های ترافیکی شهری امکان بررسی و تحلیل تمامی ساختمان‌های موجود در اطراف مسیر نیست. هم‌چنین معیارهای کنترل این ساختمان‌ها در برابر نشست‌های ایجاد شده نیز متفاوت می‌باشد. به‌منظور برطرف کردن این نقص روشی کاربردی و ساده برای برآورد وضعیت این ساختمان‌ها در برابر تونل‌سازی ارائه گردیده است. در این روش که به‌طور کامل در بخش راهکارهای پیشنهادی تحقیق بیان شد، ابتدا تحلیل زمین بکر به‌عنوان تحلیل پایه انجام شد و بر این اساس پروفیل نشست سطح به‌همراه مقادیر اعوجاج زمین استخراج گردید. سپس منحنی ترازهای تعریف شده در خصوص نواحی A و B بر اساس نتایج به‌دست آمده از این تحقیق ترسیم شد و در اطراف تونل برای اعماق دفن متفاوت ترسیم و موقعیت ساختمان‌های موجود در پروژه بر روی آن‌ها قرار گرفت. براساس این‌که هر ساختمان در کدام‌یک از نواحی قرمز، نارنجی و سبز قرار گیرد می‌توان اطمینان حاصل کرد که ساختمان دارای پتانسیل خطر است یا نیاز به تحلیل‌های دقیق‌تر اندرکنشی دارد و یا در حاشیه‌ی اطمینان قرار دارد. هم‌چنین مقادیر اعوجاج نیز بایستی براساس نتایج زمین بکر اصلاح و تصمیم نهایی در خصوص وضعیت ساختمان اخذ شود.

تشکر و قدردانی

در اینجا نویسندگان از سازمان فنی و مشاور شهرداری تهران به‌جهت اجازه‌ی استفاده از اطلاعات کلی تونل در راستای همکاری مشترک نویسنده با آن سازمان در پروژه‌ی مزبور، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

مراجع

1. Peck, R., "Deep Excavation and tunneling in soft ground", state of art., 7th ICSMFE, pp. 226-290, (1996).
2. Mair, R., Taylor, R., Burland, J., "prediction of ground movments and assessment of risk of building damage due to board tunneling", Geotecnical aspects of underground construction in soft ground, Balkema, Rotterdam, pp. 713-718, (1996).
3. Mair, R., Taylor, R., O Reilly, M., "Subsurface settlement above tunnels in clay", *J. Geotechnical*, 43: 315-320, (1996).
4. Attewell, P.B., Yeates, J., Selby, A.R.,"Soil Movements Induced by Tunnelling and Their Effects on Pipelines and Structures", Blackie and Son Ltd., London. (1986).
5. Attewell, P.B., Woodman, J.P., "Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunneling in soil", *J. Ground Engineering*. 15 (8), 36. (1982)
6. Burland, J.B., Wroth, C.P., "Settlement of Building and Associated Damage. Settlement of Structures", *BGS Conf.*, Cambridge, pp. 611–651, (1974).
7. Boscardin, M.D., Cording, E.J., ":Building response to excavation induced settlement", *J. of Geotechnical Engineering*, *ASCE* 115 (1), 1–21, (1989).
8. Burd, H.J., Houlsby, G.T., Augarde, C.E., Liu, G., "Modeling tunneling-induced settlement of masonry building", Proceeding of the Institution of Civil Engineers and Geotechnical Engineering, 143, 17–29, (2000).
9. Potts, D.M., Addenbrooke, T.I., "A structure's influence on tunnelling induced ground movements", Proc. Inst. Civ. Eng. Geotech. Eng. 125 (2), pp. 109–125, (1997).
10. Mroueh, H., Shahrour, I., "Three-dimensional finite element analysis of the interaction between tunneling and pile foundations". *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech*, 26, pp. 217–230, (2002).
11. Keshuna, M., Lieyun, D., "Finite element analysis of tunnel–soil–building interaction using displacement controlled model", *7th WSEAS Int. Conf. on APPLIED COMPUTER & APPLIED COMPUTATIONAL SCIENCE (ACACOS '08)*, Hangzhou, China, (2008).
12. Klar, M., Elkayam, I., "Direct and relaxation methods for soil-structure interaction due to tunneling", Zhejiang Univ-Sci A (Appl Phys & Eng), 11(1), pp. 9-17, (2010).

۱۳. سازمان مشاور شهرداری تهران، گزارش مطالعات فاز یک سازه‌ی پروژه‌ی تونل نیایش- صدر ، (۱۳۸۹).

۱٤. سازمان مشاور شهرداری تهران، گزارش مطالعات فاز یک ژئوتکنیک تونل نیایش- صدر، (۱۳۸۹).

15. Panet, M., Guellec, P. "Contribution à l' étude du soutènemant derrière le front de taille". *Proc. 3rd cong. Int. Soc. Rock mechanics*. Vol 2 , part B, denver. (1974).
16. Federal Highway Administration, "FHWA Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels- Civil Elelemts", Office of Technology Applications, Publication No. FHWA-NHI-09-010. (2009).